

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 002.034.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК
аттестационное дело № _____

решение Диссертационного совета от «04» июля 2019 г. № 5
о присуждении Мухину Ивану Сергеевичу, гражданину Российской Федерации,
ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 03.04.2019 г., протокол № 2 Диссертационным советом Д002.034.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр. 26, приказ 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель, Мухин Иван Сергеевич, 1986 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Создание и исследование локализованных одномерных и двумерных наноструктур для систем диагностики» защитил в 2012 году, в Диссертационном совете, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки Санкт-Петербургский Академический университет – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, работает заведующим лабораторией в Санкт-Петербургском Академическом университете РАН и научным сотрудником в Университете ИТМО.

Диссертация выполнена в Санкт-Петербургском Академическом университете РАН и в Университете ИТМО.

Официальные оппоненты:

1. Вывенко Олег Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургского государственного университета, профессор Физического факультета;
2. Андреев Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, член-корр. РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской

академии наук, заведующий лабораторией Фотоэлектрических преобразователей;

3. Александров Сергей Евгеньевич, доктор химических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, заведующий кафедрой «Физико-химия и технологии микросистемной техники»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное Государственное Автономное Образовательное Учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном заведующим кафедрой Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов Кузнецовым Денисом Валерьевичем, кандидатом технических наук, доцентом, утвержденном проректором по науке и инновациям Филоновым Михаилом Рудольфовичем, доктором технических наук, профессором, указала на следующие замечания:

- 1) Предложенная модель самоорганизованного формирования наноструктур типа наноскальпель и нановилка под действием сфокусированного электронного пучка носит скорее качественный характер, чем количественный;
- 2) Не продемонстрирована апробация созданных функционализированных микрофлюидных чипов на реальных биологических объектах;
- 3) Предложенный автокаталитический метод синтеза нитевидных нанокристаллов GaN требует дальнейшего развития совершенствования для обеспечения формирования более равномерных по геометрическим характеристикам массивов наноструктур, что важно при создании конечных функциональных структур на их основе.

Соискатель имеет более **50 (пятидесяти)** публикаций, в том числе по теме диссертации **31 (тридцать одну)** работу, опубликованную в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ и индексируемых в Международных библиометрических базах WoS и Scopus. К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся:

1. **Mukhin I.S.**, Fadeev I.V., Zhukov M.V., Dubrovskii V.G., Golubok A.O. Framed carbon nanostructures: Synthesis and applications in functional SPM tips // Ultramicroscopy - 2015, Vol. 148, pp. 151-157.

2. Lukashenko S.Y., **Mukhin I.S.**, Komissarenko F.E., Gorbenko O.M., Sapozhnikov I.D., Felshtyn M.L., Uskov A.V., Golubok A.O. Resonant Mass Detector Based on Carbon Nanowhiskers with Traps for Nanoobjects Weighing // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* - 2018, Vol. 215, No. 21, pp. 1800046.
3. Evstrapov A.A., **Mukhin I.S.**, Bukatin A.S., Kukhtevich I.V. Ion and electron beam assisted fabrication of nanostructures integrated in microfluidic chips // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* - 2012, Vol. 282, pp. 145-148.
4. Евстратов А.А., **Мухин И.С.**, Кухтевич И.В., Букагин А.С. Метод сфокусированного ионного пучка при формировании наноразмерных структур в микрофлюидных чипах // *Письма в ЖТФ* - 2011, Т. 37, № 20, С. 32-40.
5. Bogdanov A.A., **Mukhin I.S.**, Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V., Sadrieva Z.F., Kulagina M.M., Zadiranov Y.M., Lipovskii A.A., Moiseev E.I., Kudashova Y.V., Zhukov A.E. Mode selection in InAs quantum dot microdisk lasers using focused ion beam technique // *Optics Letters* - 2015, Vol. 40, No. 17, pp. 4022-4025.
6. Kryzhanovskaya N.V., **Mukhin I.S.**, Moiseev E.I., Shostak I.I., Bogdanov A.A., Nadtochiy A.M., Maximov M.V., Zhukov A.E., Kulagina M.M., Vashanova K.A., Zadiranov Y.M., Troshkov S.I., Lipovskii A.A., Mintairov A. Control of emission spectra in quantum dot microdisk/microring lasers // *Optics express* - 2014, Vol. 22, No. 21, pp. 25782-25787.
7. Mozharov A.M., Bolshakov A.D., Cirilin G.E., **Mukhin I.S.** Numerical modeling of photovoltaic efficiency of n-type GaN nanowires on p-type Si heterojunction // *Physica Status Solidi (RRL)- Rapid Research Letters* - 2015, Vol. 9, No. 9, pp. 507-510.
8. Bolshakov A.D., Mozharov A.M., Sapunov G.A., Shtrom I.V., Sibirev N.V., Fedorov V.V., Ubyivovk E.V., Tchernycheva M., Cirilin G.E., **Mukhin I.S.** Dopant-stimulated growth of GaN nanotube-like nanostructures on Si(111) by molecular beam epitaxy // *Beilstein Journal of Nanotechnology* - 2018, Vol. 9, pp. 146-154.
9. Denisyuk A.I., Komissarenko F.E., **Mukhin I.S.** Electrostatic pick-and-place micro/nanomanipulation under the electron beam // *Microelectronic Engineering* - 2014, Vol. 121, pp. 15-18.
10. Кудряшов Д.А., Гудовских А.С., Можаров А.М., Большаков А.Д., **Мухин И.С.**, Алфёров Ж.И. Моделирование характеристик двухпереходных солнечных элементов на основе гетероструктур ZnSiP₂ на кремниевой подложке // *Письма в Журнал технической физики* – 2015, Т. 41, № 23, С. 15-23.

11. Mayorov A.S., Elias D.C., **Mukhin I.S.**, Morozov S.V., Ponomarenko L.A., Novoselov K.S., Geim A.K., Gorbachev, R.V. How close can one approach the Dirac point in graphene experimentally? // Nano Letters – 2012, Vol. 12, No. 9, pp. 4629-4634.
12. Zuev D.A., Makarov S.V., **Mukhin I.S.**, Milichko V.A., Starikov S.V., Morozov I.A., Shishkin I.I., Krasnok A.E., Belov P.A. Fabrication of Hybrid Nanostructures via Nanoscale Laser-Induced Reshaping for Advanced Light Manipulation // Advanced materials - 2016, Vol. 28, No. 16, pp. 3087-3093.

Соискателем сформулированы задачи исследований, осуществлен обзор и анализ известных литературных данных и организовано проведение научных исследований в области развития комплексных методик создания и характеристики функциональных структур нанофотоники, нанoeлектроники, наномеханики, микрофлюидики и фотовольтаики на основе объединения современных экспериментальных методов, включая использование сфокусированных электронных, ионных и лазерных пучков, электронную и ионную литографию, зондовую микроскопию и литографию, наноманипулирование, осаждение и травление тонких слоев металлов и диэлектриков, а также молекулярно-пучковую эпитаксию. Разработанные методики апробированы при создании и исследовании ряда новых функциональных наноструктур: металлические и диэлектрические оптические наноантенны, микродисковые лазеры с направленным излучением, подвешенные над подложкой одиночные листы графена, механические наноосцилляторы и наноскальпели на основе аморфных углеродных нановискеров, локализованных на вершинах W-игл, GaN-нанотрубки и фотоэлектрические преобразователи на их основе.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От Олега Федоровича Вывенко, доктора физико-математических наук, профессора, Санкт-Петербургский государственный университет, профессора Физического факультета. Замечания:
 - 1) «В главе 2 представлена разработанная методика создания микро- и наноструктур для систем плазмоники и диэлектрической фотоники на основе объединения методов электронной литографии на непроводящих оптически прозрачных подложках, осаждения и травления тонких слоев металлов и диэлектриков и созданы образцы широкополосных светоулавливающих покрытий для увеличения эффективности захвата падающего света в

- тонкопленочных солнечных элементах (СЭ). Однако сведения о влиянии таких покрытий на эффективность СЭ не приводятся»;
- 2) «В главе 3 представлены данные по зависимости интенсивности излучения модифицированные микродисковых резонаторов от мощности накачки, однако не объясняется немонотонный вид таких зависимостей»;
 - 3) «В главе 4 утверждается, что происходит испарение углерода под действием электронного пучка, что представляется маловероятным при использованных его энергиях и токах. Более вероятным является процесс разложения углеводородов из материала подложки, состав которой в диссертации не указан»;
 - 4) «В главе 6 остался непонятным выбор подложки p-Si с вырожденным характером дырочного газа для создания солнечного элемента с использованием массива нитевидных нанокристаллов GaN»;
 - 5) «В работе не проверялось и не обсуждалось возможное влияние нарастания углеродных загрязнений под действием электронного пучка, которые, как известно, неизбежны при вакуумных условиях в обычных СЭМ».
2. От Вячеслава Михайловича Андреева, доктора технических наук, профессора, член-корреспондента РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, заведующего лабораторией Фотоэлектрических преобразователей. Замечания:
- 1) «В главе 2 представлены результаты по подвешиванию одиночных листов графена для исследования их транспортных свойств. Общепринятым является тот факт, что для исследования электронных характеристик структур обоснованно использовать четырехточечную схему подключения электрических контактов. Однако в работе приведены результаты только для двухточечной схемы подключения»;
 - 2) «В главе 3 экспериментально показано, что введение в систему микродискового лазера плазмонной антенны приводит не только к увеличению мощности, излучаемой лазером в верхнюю полуплоскость, но и к увеличению порога накачки лазера. При этом в случае введения диэлектрической наноантенны такого эффекта не наблюдается. С чем связано такое поведение?»;
 - 3) «В главе 4 при описании колебаний углеродного нановискера, локализованного на вершине металлического острья, используются уравнения 2-го порядка. Хотя известно, что колебания упругой балки более корректно описываются уравнением 4-го порядка. Данный факт требует пояснений»;

- 4) «В главе 5 представлены подходы для создания селективного элемента по размерам для объектов в жидкости, основанные на подходе «сверху-вниз» с применением сфокусированного ионного пучка и подходе «снизу-вверх» с осаждением материала под действием сфокусированного электронного пучка. При этом отсутствует анализ, какой из подходов является более перспективным для данной задачи»;
- 5) «В главе 6 приводятся оценки максимальной эффективности солнечных элементов на основе GaN ННК и Si подложки. Экспериментально измеренная эффективность созданных прототипов элементов существенно ниже, предсказываемой с помощью методов численного моделирования, что требует пояснений».
3. От Сергея Евгеньевича Александрова, доктора химических наук, профессора, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, заведующего кафедрой «Физико-химия и технологии микросистемной техники»: Замечания:
- 1) «В первой главе, посвященной обзору существующих методов и технологий создания микро- и наноструктур, представлены сведения, которые, с моей точки зрения, носят слишком общий характер и не содержат достаточное количество информации, являющейся важной для того, чтобы провести их сравнительный анализ, так как во многих разделах не приводятся данные о достигнутых к настоящему времени разрешении методов, производительностях процессов и т.д. Имеются и неточности, например на стр. 23 автор пишет, что "электронная литография, как и технология сфокусированного ионного пучка ...", однако очевидно, что речь идет лишь об электронно-лучевой литографии. На стр. 38 утверждается, что "... газофазное осаждение позволяет равномерно покрывать материалом все поверхности рельефа", но эта особенность процесса химического осаждения из газовой фазы может наблюдаться только при кинетическом режиме его протекания»;
- 2) «На стр. 39 автор пишет о том, что "скорость протекания химической реакции газофазных процессов зависит от двух факторов: термодинамического, определяющего направление реакции, и кинетического, контролирующего транспортные явления, происходящие в процессе роста материала". Это утверждение является некорректным, так как скорость процесса химического осаждения из газовой фазы, а это наиболее правильное название описываемого метода, может зависеть от различных факторов в зависимости от того, в каком режиме протекает процесс и его реакционной схемы»;

3) «В диссертации применены разнообразные и достаточно сложные экспериментальные методы, использованные как для получения микро- и наноструктур, так и для исследования их характеристик, однако, с моей точки зрения, они описаны очень конспективно и явно в недостаточной степени. В лучшем случае указывается марка используемого прибора, опускаются режимы процессов, практически отсутствуют характеристики чистоты используемых реагентов, не всегда приводятся описания методик подготовки подложек, в подавляющем большинстве отсутствуют погрешности измерений. Например, автор в таблице 2.1 приводит параметры травления аморфного кремния в "индуктивно-связанной плазме ...". Приведены не вполне корректные величины: "поток SF₆" - это расход, я могу догадаться, что означает "мощность ICP", но что означает "мощность RF" остается загадкой, частоты генераторов вообще не указаны»;

4) «На стр. 65 автор указывает на использование "сухого реактивного ионного травления в Ar⁺ плазме". Этот процесс представляет собой ионное травление, так как в нем не используются реагенты, и не протекают химические реакции»;

5) «Во второй главе обсуждается процесс манипулирования одиночными микро- и наночастицами. Мне показалось, что отсутствует четкость в описании сил, действующих на частицу. На стр. 70 автор пишет, что "наночастица на поверхности удерживается различными силами, в том числе силой Ван-дер-Ваальса, силой адгезии, электростатической силой и т.д.", однако силы Ван-дер-Ваальса имеют электростатическую природу, а что подразумевается под силой адгезии хотелось бы услышать от диссертанта»;

6) «В п. 3.1 автор рассматривает процесс формирования наноантенны "методом осаждения материала Pt/C под действием сфокусированного электронного пучка в присутствии газов-прекурсоров C₉H₁₆Pt в камере СЭМ". Хочу заметить, что это соединение имеет температуру плавления около 26-29 °С, то есть газом не является. Вероятно, речь идет о паре, но тогда желательно более детально описать систему подачи его в камеру и измерения расхода. Проводился ли химический анализ выращенных из этого реагента нановискеров, и каким образом оценивалась скорость осаждения?»;

7) «В п. 4.4 рассматривается резонансный детектор масс на основе углеродного наноосциллятора. Очевидно, что на погрешность измерений должна оказывать влияние точность позиционирования наночастицы или частиц на кончике наноосциллятора, однако в работе этот вопрос не обсуждался. Желательно эти данные, если они имеются, представить на защите диссертации»;

- 8) «Обсуждая в п.4.6 создание функциональных СЗМ зондов, диссертант анализирует полученные с их помощью нетривиальные результаты, касающиеся возможного изменения формы мениска с вогнутой на выпуклую под действием различных сил (с.151). Мне никогда не попадалась подобная информация, относящаяся к мезопористым адсорбентам, так как это должно отчетливо проявляться на изотермах адсорбции. Возможно ли какое-то иное объяснение обнаруженным явлениям?»;
- 9) «Не могу не отметить, что в русскоязычных физическом и химическом словарях вполне достаточно терминов для описания любых известных явлений, процессов и т.д. В этой связи, я не понимаю, зачем использовать термин «прекурсор», представляющий собой написание английского слова «precursor» на кириллице, которое также не является химическим термином, а достаточно случайно стал применяться в англоязычной литературе в области химии. Это относится и к другим терминам, например "паттернирование" (стр. 22)»;
- 10) «В работе имеется некоторое количество опечаток, неудачных выражений или неточностей. Например: "... процесс литографии заключается в переносе шаблона из одной среды в другую." (стр.25), "механизм формирования структур методом МПЭ далек от равновесного термодинамического состояния..." (стр.32), "...гетероструктуры с электронным ограничением электронов и дырок..." (стр.34) и др. Кроме того на многих рисунках (например, 3.10а, 4.29, 6.8 и др.) диссертант использует комментарии и названия осей на английском языке».
4. От Олега Алексеевича Агеева, доктора технических наук, член-корреспондента РАН, профессора кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, ФГАОУ ВО «Южный Федеральный университет» и Максима Сергеевича Солодовникова, кандидата технических наук, доцента кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, ФГАОУ ВО «Южный Федеральный университет».
- Замечания:
- 1) «В разделе 3.3 описывается методика совмещения координат воздействия СЭМ и ФИП для неразрушающей модификации поверхности дискового микрорезонатора, однако в системах Cross Beam и Dual Beam данная методика является стандартной. Из описания неясно – в чем новизна предложенной модели?»;
- 2) «В разделе 3.3 описывается исследование влияния канавок глубиной 5 и 10 нм, сформированных фокусированным ионным пучком на спектры

микрофотолюминесценции микродискового лазера, однако отсутствует сравнение спектров»;

3) «В работе не приведен анализ глубины внедрения ионов галлия в структуру InAs/InGaAs при ускоряющем напряжении 30кэВ и отсутствует объяснение механизма влияния внедренных ионов на спектры фотолюминесценции»;

4) «Для функционализированных нанозондов с улучшенными характеристиками не представлены результаты экспериментальных исследований влияния количества циклов сканирования на измерение параметров острия зонда. Это особенно актуально для углеродных наноструктур в виде нановилки и наноскальпеля, использующихся при проведении силовой литографии и манипулировании микро- и наночастиц, т.к. при силовых воздействиях на поверхность образцов будут происходить повышенный износ острия, в результате которого формирование наноструктур с воспроизводимыми параметрами, а также точность перемещения микро- и наночастиц может существенно снизиться»;

5) «При проведении экспериментальных исследований зондов на основе Pt/C нановискеров и сравнении полученных результатов со стандартными Si зондами не представлены марки и параметры исходных кантилеверов, на которые происходило осаждение, а также не приведены режим (контактный или полуконтактный) и параметры проведения измерений (сила прижима зонда к поверхности образца, скорость сканирования) методом атомно-силовой микроскопии, в результате чего сложно оценить способность зондов на основе Pt/C нановискеров адекватно визуализировать рельеф гидрофильных поверхностей с суб-100нм топографическими особенностями»;

6) «Не приведена информация о влиянии размеров мез и краевых эффектов на энергоэффективность генерации однофотонного излучения в структурах CdTe/ZnTe, что затрудняет оценку перспективности использования предлагаемой методики для создания источников однофотонного излучения»;

7) «При исследовании характеристик микродисковых лазеров с металл-углеродными и кремниевыми наноантеннами не приводится оценка (прогноз) возможности реализации в таких структурах электрической накачки и совместимости предлагаемых методов подавления излучения на боковых модах с техпроцессами групповой обработки»;

8) «В разделе, посвященном микродисковым лазерам, автор ссылается на результаты численного моделирования, выполненного, очевидно,

- непосредственно, им. Однако никакой информации об используемых математических моделях и методах моделирования не приводится».
5. От Андрея Михайловича ИONOва, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук и Сергея Ивановича Божко, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника, ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук. Замечания:
 - 1) «В главе 4 представлены результаты по формированию отдельных вискероv и многомерных наноструктур на их основе. Однако не приведено никаких данных об их кристаллической структуре»;
 - 2) «На рис. 2 представлены изображения нанодисков кремний-золото. Из фотографий следует, что после лазерной модификации период наноструктуры изменился, что, по-видимому, связано с неправильным указанием масштаба»;
 - 3) «На стр. 24, помимо стилистических замечаний при описании колебаний вискера, возникает неясность в объяснении влияния адсорбции на изменение АЧХ, в частности добротности. На наш взгляд, стоило бы проиллюстрировать более детально модельные расчеты в сравнении с экспериментальными данными».
 6. От Кирилла Валерьевича Гоголинского, доктора технических наук, главного научного сотрудника ООО «Константа УЗК». Замечания:
 - 1) «В материалах диссертации и автореферата не рассмотрены технические и экономические аспекты создания технологии серийного производства разработанных и исследованных наноструктур для использования их в различных сенсорах (датчиках)»;
 - 2) «К сожалению, соискатель в своей работе не уделил внимание перспективам использования разработанных технологий для создания микро- и наноэлектронных механических систем (МЭМС и НЭМС), используемых в различных типах датчиков».
 7. От Павла Николаевича Брункова, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника, заведующего лабораторией, лаборатория диагностики материалов и структур твердотельной электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Замечания:
 - 1) «Из текста автореферата не понятно, как контролировалось удаление остатков резистов и технологических загрязнений листе графена после термического отжига, реализованного путем пропускания через него электрического тока»;

2) «В работе реализован метод формирования наноструктур под действием сфокусированного электронного пучка, который заключается в разложении молекул газа-прекурсора при взаимодействии со вторичными электронами, рождаемыми при рассеянии энергии первичного электронного пучка в образце. Было показано, что данная технология за счет перемещения точки фокусировки электронного пучка в пространстве позволяет формировать многомерные наноструктуры. Однако не понятно, какими процессами определялось время экспозиции, а также величина и скорость перемещения точки фокусировки».

8. От Анатолия Алексеевича Малыгина, доктора химических наук, профессора, заведующего кафедрой химической нанотехнологии и материалов электронной техники, Санкт-Петербургский государственный технологический университет (технический университет). Замечания:

1) «В работе использованы для решения поставленных задач, действительно, современные, в основном, физические методы формирования наноструктур. В то же время хорошо известно, что при реализации нанотехнологических процессов широкое применения находят различные варианты химических подходов. К сожалению, автор, судя по содержанию автореферата, практически не рассматривает достаточно широкий спектр различных химических нанотехнологий: золь-гель процесс, химическое осаждение из газовой фазы, метод молекулярного наслаивания (в зарубежных публикациях имеет название Atomic Layer Deposition – ALD) и близкий к нему по сути комбинаторный синтез твердофазных полипептидов по Меррифилду, технология пленок Ленгмюра-Блоджетт, темплатный синтез. Указанные методы имеют ряд преимуществ перед рассматриваемыми в диссертации приемами как с точки зрения простоты аппаратного оформления и «мягких» технологических режимов (низкие температуры, проточная система при атмосферном давлении или небольшом вакууме), так и по качеству получаемых нанопокровов (конформность, адгезия и др.). Также при рассмотрении методов прецизионного травления целесообразно было оценить такое активно развивающееся в последние 10-15 лет направление, как атомно-слоевое травление (Atomic Layer Etching – ALE)»;

2) «Современные объекты нанофотоники, наноэлектроники фотовольтаики, микро- и наносистемной техники представляют собой сложные как по составу, так и по структуре композиции. Получать такие материалы или изделия с использованием какого-то одного приема синтеза невозможно. Часто требуется сочетание технологий синтеза, переноса изображения, травления. Классическим примером может служить современная планарная технология интегральных

схем. И в этом плане важным представляется научно обоснованный подбор и последовательности применения в технологическом цикле требуемых приемов, оптимизация режимов процессов на разных стадиях. И автор успешно решает поставленные задачи, применяя указанные подходы, т.е. фактически, предлагая программу создания целого продукта, которая может быть использована в дальнейшем на практике как основа для разработки маршрутной карты для создания материалов или изделий (см., например, текст к рисункам 1, 2, 4, 11, 3 и др. в автореферате). Поэтому, как представляется, при употреблении термина «Комбинированный метод» (см., например, положения, выносимые на защиту – пп. 1, 2, 4, 5, некоторые разделы заключения) необходимо не просто перечислять состав входящих в него процессов, а значительное внимание уделять научному обоснованию их необходимости и выявляемые при этом элементы новизны»;

3) «Есть некоторые не очень удачные словосочетания. Например, на стр. 4 автореферата автор пишет «Среди основных технологий можно выделить коллоидную химию...». Более правильно сказать о технологиях, в основе которых заложены коллоидно-химические подходы»;

4) «Можно было существенно сократить по объему обоснование актуальности работы (стр. 2 – 6 автореферата) за счет удаления из текста подробного изложения достаточно хорошо известных вопросов».

9. От Виктора Яковлевича Принца, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией физики и технологии трехмерных наноструктур, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН. Без замечаний.

10. От Сергея Арсеньевича Кукушкина, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией, лаборатория структурных и фазовых превращений в конденсированных средах ИПМаш РАН. Без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается большим опытом работы в областях, относящихся к проблематике диссертационной работы, таких как: методы экспериментальной физики, физика и технологии наногетероструктур, оптика, твердотельная оптоэлектроника и фотоника, плазмоника, солнечная энергетика, физика полупроводников.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны научные положения, обогащающие знания в области методов и методик экспериментальной физики, используемые при создании и исследовании функциональных наноструктур и наносистем различного назначения с улучшенными характеристиками, включая элементы для нанофотоники и плазмоники, наноэлектроники, солнечной энергетики и наномеханики;

на основе комбинации методов фотолитографии, осаждения тонких слоев металлов и травления оксидов развита методика подвешивания на расстоянии порядка

100 нм над подложкой отдельных листов двумерных Ван-дер-Ваальсовых материалов, исключая эффект влияния близости подложки, искажающий электронные характеристики двумерных материалов. Экспериментально доказано, что данный подход обеспечивает создание графеновых структур с рекордной подвижностью носителей заряда;

создана методика формирования на поверхности полупроводниковых структур металлических, металл-углеродных и диэлектрических нанобъектов с точностью позиционирования 50 нм. Экспериментально продемонстрировано, что локализации с использованием разработанной методики наноантенн на верхней или боковой поверхностях микродисковых лазеров с массивами квантовых ям позволяет управлять направленностью излучения из лазерной структуры, а при формировании точечных и протяженных нанодефектов на верхней поверхности резонатора возможно управление модовым составом излучения;

предложена методика формирования аморфных углеродных и металл-углеродных 1D, а также 2- и 3D каркасных наноструктур на вершине твердотельных острий под действием сфокусированного электронного пучка в вакууме. Показано, что геометрической формой создаваемых наноструктур можно управлять, как путем перемещения точки фокусировки электронного пучка, так и выбором технологических режимов осаждения материала под сфокусированным пучком электронов;

развита методика переноса наночастиц под сфокусированным электронным пучком в вакуумной камере сканирующего электронного микроскопа на основе комбинированного воздействия на наночастицу сфокусированным электронным пучком и электрическим полем от острой металлической иглы. Экспериментально продемонстрировано, что с помощью разработанной методики можно переносить наночастицы на резонансные детекторы масс в виде одиночных нановискеров или

наноструктур более сложной геометрии. Данный подход обеспечил калибровку сенсоров масс с чувствительностью на уровне единиц фемтограмм;

разработана и апробирована экспериментальная методика разделения по размерам одиночных микро- и нанообъектов, включая биообъекты, основанная на создании ловушек путем микро- и наноструктурирования каналов стеклянных микрофлюидных чипов с помощью технологии фокусированных электронных и ионных пучков;

экспериментально показана возможность создания фотоэлектрических преобразователей на основе одиночных GaN нитевидных нанокристаллов (ННК) или их массивов, выращенных на Si подложках с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации результативно, с получением обладающих новизной результатов:

использован комплекс существующих численных методов расчета характеристик солнечных элементов на основе массивов нитевидных нанокристаллов (ННК), сформированных на полупроводниковой подложке на основе программного пакета, учитывающий: зонные диаграммы прибора, распределение в гетероструктуре концентраций неравновесных носителей заряда и поглощение падающего излучения, что позволило предложить новые конструкции фотоэлектрических преобразователей на основе гетероструктуры p-Si (подложка) / n-GaN ННК и оценить их предельно достижимые характеристики;

с помощью разработанных аналитических моделей доказано, что формирование каркасных углеродных наноструктур разветвленной формы обусловлено эффектом самоорганизации углеродного основания, имеющего форму трапеции, под влиянием увеличения его поверхностной энергии на начальном этапе роста;

впервые разработана аналитическая модель роста GaN нанотрубок при молекулярно-пучковой эпитаксии, учитывающая процессы миграции адатомов по поверхности подложки и боковой поверхности структуры, а также прямого попадания атомов на поверхность растущей структуры и их десорбции. Зарождение наноструктуры в виде трубки с полостью обуславливается быстрой релаксацией упругих механических напряжений в растущей квазиодномерной структуре, вызванных рассогласованием параметров кристаллических решеток GaN и Si, неравномерностью радиального распределения легирующей примеси Si в

*GaN наноструктуре и понижением барьера нуклеации GaN в областях с увеличенным содержанием легирующей примеси;

с помощью численных методов изучены процессы механических колебаний связанных осцилляторов в виде двух расположенных один на другом наноцилиндров, при жесткой фиксации основания нижнего цилиндра. Показано, что в такой модели, адекватно представленной экспериментальной системой «W острие – C нановискер», при изменении силы связи между осцилляторами возможен существенный сдвиг резонансной частоты колебаний верхнего осциллятора и увеличение его добротности, что улучшает чувствительность резонансных детекторов масс такого типа.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

создана и внедрена методика манипулирования одиночными микро- и нанообъектами массой порядка 10^{-15} г под действием сфокусированных электронного или лазерного пучков в вакууме или при атмосферном давлении, что может быть использовано в наноманипуляторах нового поколения, характеризующихся высокой точностью позиционирования частиц;

предложена конструкция и создан прототип резонансного детектора масс на основе одиночного аморфного нановискера, локализованного на вершине металлического острья, а также предложена методика его калибровки путем фиксации на вершине нановискера одиночных сфер известной массы в диапазоне ($10^{-14} - 10^{-15}$) г;

разработаны и апробированы методики создания спектрально селективных элементов для управления модовым составом и направленностью излучения микродисковых лазеров на основе массивов квантовых точек, что может быть использовано при создании электрооптических схем для вычислительных систем нового поколения, характеризующихся высокой энергоэффективностью;

представлены новые конструкции солнечных элементов на основе одиночных GaN нитевидных нанокристаллов и их массивов на Si подложках и реализованы их прототипы перспективные для создания сверхкомпактных источников питания, в том числе для микро- и наноэлектромеханических систем;

созданы прототипы функциональных зондов для сканирующей зондовой микроскопии на основе углеродных и металл-углеродных наноструктур, обладающие улучшенными характеристиками (увеличенным аспектным отношением, увеличенной механической устойчивостью) по сравнению со стандартными Si зондами;

разработаны и апробированы методики создания функциональных наноструктур в каналах микрофлюидных чипов, обеспечивающие фиксацию и разделение объектов по размерам в диапазоне от сотен нм до единиц мкм.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что все использованное оборудование для создания и исследования структур имело свидетельства об аттестации. Достоверность результатов также подтверждена их верификацией при разнообразном тестировании, совпадением экспериментальных данных с аналитическими расчетными оценками, контролем условий экспериментов, воспроизводимостью результатов, четкой физической интерпретацией полученных результатов и согласованностью их с современными представлениями о предмете исследования. Результаты теоретических расчетов режимов работы солнечных элементов на основе массивов НК и полупроводниковой подложки основываются на признанных теоретических положениях и моделях, аналитические модели формирования углеродных наноскальпелей и нановилок под действием сфокусированного электронного пучка и GaN нанотрубок при молекулярно-пучковой эпитаксии с высокой степенью совпадения согласуются с экспериментально измеренными параметрами. Экспериментальные данные амплитудно-частотных характеристик для связанных осцилляторов «W острие – C нановискер» количественно соответствуют результатам натуральных экспериментов.

Личный вклад соискателя заключается:

- в формулировке цели, задач и проведении научных исследований;
- выявлении на основе проведенного анализа литературных данных наиболее эффективных путей развития методов и методик создания функциональных наноструктур и наносистем широкого назначения;
- создании и развитии комплексных методов формирования микро- и наноструктур с помощью электронной литографии на непроводящих подложках совместно с методами осаждения и травления материала;
- в создании метода формирования наноструктур разной размерности под действием сфокусированного электронного пучка;
- в создании комплексных методов модификации поверхности микродисковых лазеров для управления модовым составом и направленностью излучения;
- в создании комплексных методик формирования массивов микро- и наноструктур в каналах микрофлюидных чипов; в развитии методов процессирования прототипов солнечных элементов на основе одиночных GaN нановискеров и их массивов.

На заседании 04.07.2019 г. Диссертационный совет принял решение присудить Мухину Ивану Сергеевичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 19 докторов наук, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против нет, недействительных бюллетеней 1.

Председатель Диссертационного совета,
д.т.н., проф.

В.Е. Курочкин

Ученый секретарь Диссертационного совета,
д.ф.-м.н.

А.Л. Буляница

04.07.2019 г.

